

修 士 論 文

BEAT/BIT :  
ものを叩く音を信号として利用する通信システムの開発

令和 元年度

指導教員 串山 久美子

( 17893528 )

宮下 恵太

首都大学東京大学院  
システムデザイン研究科 博士前期課程  
インダストリアルアート学域

提出日：2020 年 1 月 31 日

# BEAT/BIT :

## ものを叩く音を信号として利用する通信システムの開発

---

### 要旨

近年の技術発達によるコンピュータの小型化，低価格化によって，より多くのコンピュータが多様な形で我々の生活の中へ入り込んでいる．それに伴い，人間とコンピュータ間のインタラクションは重要度を増し，より人間にとって使いやすく，わかりやすいインタフェースが求められるようになっている．

そのような人間にとって自然なインタフェースは，我々がコンピュータを意識せずとも使用できるようにするものである．一方で，現代の情報技術の基盤であるコンピュータを不可視なものにすることは我々の社会が常に抱える，テクノロジーをどのように用いるべきか，という課題を覆い隠してしまう可能性がある．

このような問題意識のもと，筆者はコンピュータを人間に合わせるだけではなく，人間がコンピュータそのものを理解し，コンピュータに合わせて人間を変化させるようなインタフェースがあってもよいのではないかと考える．コンピュータ同士の通信においては，情報を電圧の高低によって表される0と1のデジタル情報として扱うが，人間はその電気信号を知覚することができない．一方で，人間はこれまで音や光などの知覚可能で，身体的な信号をコミュニケーションに用いてきた．そこで，このような身体的な信号をコンピュータ間の通信に利用することで，本来知覚することのできない電気信号を知覚化し，情報の流れへの直接的な干渉が可能になるのではないかと考えた．

そこで，本研究では人間の身体的動作によって発生させることのできる身体的な信号を用い，コンピュータで用いられるデジタル情報を伝送できるようにすることを目的とし，通信システムの開発を行う．音はコンピュータの登場以前から情報伝達的手段として広く用いられてきた．本研究では，「ものを叩く」という人間にも機械にも可能な動作によって生まれる音に着目し，ものの打音を信号として用いる場合の通信方法の設定と，情報の送受信を行うためのハードウェアの開発を行う．その後，開発したシステムを用いた作品を制作し，その考察を通じて検証を行う．これにより，人間とコンピュータで同一の信号を用いたコミュニケーションの持つ可能性について明らかにする．

本論文の構成を以下に示す．

第1章では序論として、本研究の概要と、本論文の構成について述べる。

第2章では、ヒューマン・コンピュータ・インタフェースの先行事例を概観し、近年の人間を中心に据えたインタフェースデザインが持つ課題について述べ、本研究の目的を定める。

第3章では、開発する通信システムに関する関連研究について調査し、開発する機能とシステムの構成を定める。

第4章では、ものの打音によって信号を伝送する通信システムの開発を行う。はじめに、ものの打音を信号に用いる際の通信方法を定める。次に、設定した通信方法を用いた試作を行う。入力したデータを、ソレノイドの制御データに変換し、実際に物体を叩くことによって信号を送る。その信号をマイクを使用して受信機へ入力し、復号を行う。開発したプロトタイプを用いて実験を行ったところ、この手法でデジタル情報を送信することが可能であることがわかった。

次に、これらの試作に改良を加え、通信端末装置の実装を行う。送信機は受け取ったデータを処理するマイコンとソレノイドを含む音源モジュールからなる。シリアル通信によってマイコンにデジタル情報を送信することで、バイナリを打音として送信することができる。受信機はマイクと小型のコンピュータによって構成される。マイクで拾った信号から打音のアタックを検出し、元のバイナリ列へと複合する。受け取ったデータはシリアルポートを通じ他の端末へ送信することができる。

第5章では、開発したシステムを動作させるため、作品の制作を行う。本作品は情報源、送信機、信号、受信機、受信者という構成からなる。情報源は機械学習によって文章を学習させ、リアルタイムに生成させた文章である。生成した文章を文字ごとに ASCII コードの値として送信機へと渡し、打音として送信する。それを受信機で受信し、元の値へと複合する。複合した数値は受信者である感熱式プリンタに送られる。プリンタは受け取った数値を対応するアルファベットに変換し、それらを人間が読むことのできる文字の形で出力する。

第6章では、開発したシステムと制作した作品についての考察を行う。

第7章は結論である。本研究では、人間が知覚することのできる身体的な信号を用いコンピュータ同士が通信を行うことを目的とし、ものの打音を信号に用いる通信システムの開発を行った。これにより、ものを叩く音という身体的動作による音声信号を用いてデジタル情報が送信できることがわかった。今後の展望として、通信システムとしての精度や通信速度の改善、複数の音源を用いたパラレル通信への拡張などがあげられる。本研究が、人間とコンピュータの新たな関係性を提示することを期待する。



# BEAT/BIT:

## Development of communication system using hitting sound

---

### Summary

In recent years, with the development of technology, computers have become more and more closely related to our lives. With the advance of integrated circuit technology, the miniaturization and cost reduction of computers are progressing day by day, and computers are being used everywhere. Accordingly, the number of situations in which humans interact with computers is increasing. Accordingly, the interface for exchanging information between computers and humans has been required to be easier for humans to understand and use.

The permeation of human-friendly interfaces into our environment allows us to use computers without being aware of their existence. I think this leads to indifference to the important question of how people should connect with technology. For such a problem, it is necessary to be able to perceive the existence of a computer more physically.

The purpose of this research is to enable perceiving communication between computers by using physical signals.

Communication using sound has been performed before humans invented computers. Among them, communication using the hammering sound is based on the physical movement of "hitting". In this study, we focus on the physical movement of hitting objects and develop a communication system using the sound of hitting objects as a signal. To development, first set the communication method for transmitting and receiving digital signals by hitting sound. Next, we implement a communication terminal that transmits and receives information according to it. After that, a work is produced using the developed communication system, and it is verified whether it works as a communication system by considering the work. As a result, it was found that digital information can be transmitted by using the physical signal of the hammering sound. Therefore, we believe that this system makes it possible to communicate between computers using physical signals.



## 目次

要旨	i
Summary	iii
1 序論	1
1.1 本研究の概要	1
1.2 本論文の構成	1
2 本研究の背景と目的	3
2.1 ヒューマン・コンピュータ・インタフェースの歴史	3
2.2 人間中心的インタフェースのもたらす問題	5
2.3 本研究の目的	6
3 先行研究	8
3.1 音を用いた通信	8
3.2 身体的動作によるインタラクション	9
3.3 情報の可聴化	10
3.4 本章のまとめ	13
3.4.1 開発する機能の設定	13
3.4.2 まとめ	13
4 通信システムの開発	14
4.1 システムの概要	14
4.2 ものの打音による通信方法	15
4.2.1 変調方式	15
4.2.2 同期方式	17
4.3 プロトタイプ制作	20
4.3.1 ハードウェア	21
4.3.2 制御用アプリケーション	21
4.3.3 検証	22
4.4 通信端末の実装	23
4.4.1 送信機	23
4.4.2 音源モジュール	23
4.4.3 制御用基板	23
4.4.4 受信機	26
4.5 本章のまとめ	26
5 作品の制作	28
5.1 作品の構成	28

5.2	作品の実装 . . . . .	30
5.2.1	深層学習による文章の生成 . . . . .	30
5.2.2	サーマルプリンタによる文字の出力 . . . . .	30
5.2.3	筐体の制作とシステムの統合 . . . . .	31
5.3	作品の展示 . . . . .	32
5.4	まとめ . . . . .	34
6	考察 . . . . .	36
6.1	通信システム的視点 . . . . .	36
6.2	インタフェース的視点 . . . . .	37
7	結論 . . . . .	39
	謝辞 . . . . .	41

# 1 序論

## 1.1 本研究の概要

近年、技術の発展によってコンピュータはますますわれわれの生活に密接なものとなっている。集積回路技術の進歩によるコンピュータの小型化・低価格化は日ごとに進み、あらゆる場所でコンピュータが使用されるようになってきている。それに従い、人間がコンピュータと関わる場面はますます増加している。それに従い、コンピュータと人間の間で情報をやりとりするインタフェースは人間にとってよりわかりやすく、使いやすいものが求められるようになっている。

人間にとって使いやすいインタフェースがわれわれの環境に浸透してくことで、われわれはコンピュータの存在を意識することなくそれを使うことができるようになる。これは人々がテクノロジーとどのような関係性を結んでいくべきか、という重要な問題への無関心につながってしまうのではないかと考える。このような問題に対して、より身体的にコンピュータの存在を知覚できるようにする必要があると考える。

本研究の目的は本来知覚することのできないコンピュータ同士の通信を、身体的な信号を用いて行えるようにすることである。

音を用いたコミュニケーションは人間がコンピュータを発明する以前から行われてきた。そのなかで、ものの打音をもちいたコミュニケーションは「叩く」という身体的な動作をもちいたものである。そこで、本研究ではものを「叩く」という身体的動作に着目し、ものを叩く音を信号に用いた通信システムの開発を行う。開発にあたり、はじめにデジタル信号を打音で送受信するための通信方法を設定する。次にそれに従って情報を送受信する通信端末装置の実装を行う。本システムはソレノイドを制御しものを叩くことで信号を送信する送信機と、その音をマイクで拾い、デジタル解析することによって元の数値情報に復号する受信機からなる。その後、開発した通信システムを用い作品を制作し、その作品を考察することで通信システムとして機能するかどうかの検証を行う。その結果、ものの打音という身体的な信号を用いて、デジタル情報を伝達することができることがわかった。よって、本システムにより身体的な信号を用いてコンピュータ同士の通信を行うことが可能になったと考える。

## 1.2 本論文の構成

本論文は全7章で構成されており、それぞれの章の内容を以下に示す。



## 第 1 章 序論

第 1 章では、序論として、本研究の概要について述べたのち、本論文の構成について説明する。

## 第 2 章 本研究の背景と目的

第 2 章では、研究背景としてヒューマン・コンピュータ・インタフェースの先行事例を概観し、近年の人間を中心に据えたインタフェースデザインが持つ課題について述べ、本研究の目的を定める。

## 第 3 章 先行研究

第 3 章では、開発する通信システムに関する先行事例について調査し、開発する機能とシステムの構成を定める。

## 第 4 章 通信システムの開発

第 4 章では、ものの打音を信号として利用する通信システムの開発を行う。まず、ものの打音を用いた通信方法を定め、それにもとづくプロトタイプ制作を行う。制作したプロトタイプを用いた実験を行い、評価を行う。次にプロトタイプを改良し、通信端末装置の実装を行う。

## 第 5 章 作品の制作

第 5 章では、開発したシステムを用いた作品の制作を行う。制作する作品に必要な機能を定め、その実装を行う。

## 第 6 章 考察

第 6 章では、開発したシステムと制作した作品について考察を行う。

## 第 7 章 結論

第 7 章では、結論として、本研究を総括的に振り返り、今後の展望について述べる。

## 2 本研究の背景と目的

### 2.1 ヒューマン・コンピュータ・インタフェースの歴史

コンピュータが発明された当時，コンピュータの制御はパンチカードなどによって一括で司令を与えるバッチ方式が主流であった．しかし，電子計算機であるコンピュータを，知的能力の拡張や強化を行うための「知的増幅装置」として捉えるという考え方が示されることで，インタフェースをより人間にとって自然な対話の形へと改良していくという流れが生まれた．1960 年，J.C. リックライダーが「ヒトとコンピュータの共生 [1]」という論文の中で提示した，情報の入出力を即座に行い，コンピュータとリアルタイムに対話をするという理念を実際に具体化したものがアイヴァン・サザランドの SketchPad[2]（図 1）である．Sketchpad はペン型のデバイスを用い，ディスプレイに様々な図形を描くことでコンピュータへの指示を行った．これは後の GUI(Graphical User Interface) の起源となるものである．また，その影響を受け，ダグラス・エンゲルバートは人間がコンピュータを操作するインタフェースの改良に取り組み，マウスとキーボード，そして五本指キーボードによる NLS (oNLine System) [3]（図 2）を開発した．



図 1 Sketchpad 出典：  
<https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-574.pdf>



図 2 NLS (oN Line System) 出典：<https://www.dougelbart.org/images/pix/img0008.jpg>

エンゲルバートの時代までは，コンピュータを用いた人間知能の拡張は一部の人間のみを対象としたものであった．しかし，アラン・ケイは誰にでもコンピュータが利用できるようになる「パーソナル・コンピュータ」という考え方を 1972 年に Dynabook[4] によって示し，その機能の一部を Xerox 社の Alto とシステムソフトウェアである Smalltalk によって実装

した。これはグラフィカルなインタフェース（GUI）を搭載し、マウスとキーボードによって操作するという現在も使われるコンピュータの原型となっている。

また、Apple 社はこのような GUI を搭載したコンピュータ Macintosh（図 3）を 1984 年に発表し、商業的な成功を収めた。GUI を用いた様々なアプリケーションをコンピュータに搭載し、コンピュータを難しい計算機ではなく知的で創造的な道具として提示することで、人々にその有用性を訴えたのである。このようにして、一部の人間だけではなく、個人のためのコンピュータが一般へと普及していった [5]。



図 3 Macintosh 出典:<https://www.flickr.com/photos/mwichary/2179402603/>

一般へコンピュータが普及すると、より、その使いやすさやわかりやすさが求められるようになっていき、インタフェースも人間の身体や認知にもとづいたわかりやすいデザインがその中心的なものになった。一方で、人間がすぐに使いこなせないような、わかりにくいインタフェースはすぐに排除されてしまう。これは、コンピュータをより簡単に操作したいという人間の欲求の表れであると言える。

技術の進歩により、コンピュータの小型化が進んでいくと、1991 年にマーク・ワイザーによってコンピュータが世の中の至るところに遍在し、環境へ溶け込んでいくことを予見する「ユビキタス・コンピューティング [6]」という概念が示された。これは現在まで情報科学



の研究に大きな影響を与え、あらゆるものがインターネットに接続され、通信を行うという IoT (Internet of Things) などの原点になっている。

コンピュータが環境へ溶け込み、その姿を消していくというユビキタス・コンピューティングをさらに推し進めたのが石井裕の Tangible Bits[7] である。Tangible Bits はコンピュータ上のデジタル情報に、実際に触れることのできる物理的実体を与えることで、情報を人間の手で直接操作したり、意識の周辺による情報認知を可能にするものである。このような実空間上で自然に情報とのインタラクションを行う TUI (Tangible User Interface) はその後のインタフェースデザインへ大きく影響を与えた。

## 2.2 人間中心のインタフェースのもたらす問題

インタフェースデザインはこれまで、いかに人間にとって使いやすく、わかりやすいインタラクションを提供するかという問題に取り組んできた。コンピュータの小型化と、自然なインタフェースによって、身の回りの環境にコンピュータが溶け込むことで、人間は、コンピュータを使っているという意識なく、その恩恵を受けることができるようになる。これによって、どのようなことが起きるのであろうか。

人間はこれまで、さまざまな道具を用いてその文明を発展させていった。人間が道具を使うとき、それを使っていることを意識せずに使用することができる状態は、道具が透明化した状態であるといえる。道具のそのような性質を「道具の透明性」という [8]。マウスやキーボードのような、コンピュータとの対話を前提としたインタフェースの場合、そのインタフェースが透明化したとしても、コンピュータの存在を意識しないことはない。それはコンピュータという操作の対象を目の前にしているからである。しかし、コンピュータがハードウェア的に小さく薄くなっていき、環境に溶け込んでいくと、インタフェースだけがそこに残ることになる。そのようなとき、操作の対象はインタフェースとなり、我々の意識からコンピュータの存在は消滅する。人間を中心に据え設計された、使いやすいインタフェースデザインは、不可視なものとなったコンピュータの存在を消滅させる。果たしてこのことは良いことと言えるのだろうか。

人間とテクノロジーの関係性は技術の進歩や社会の動きとともに変化してきた。新しい技術が世の中に広まっていくとき、我々はその技術をどのように使っていくべきか？という問題に直面する。AI によるシンギュラリティ、情報社会におけるプライバシーなどの技術が生む問題に対し、我々は常に議論を続ける必要がある。

その中で、現在の我々の生活の土台とも言える情報技術の根幹となるコンピュータの存在を覆い隠し、ブラックボックス化させることは、この問題を覆い隠すことにつながってしまう可能性があると考える。

人間の想像力の範疇で考えられた人間中心のインタフェースに頼りすぎることなく、その関係性について考え続けるためには、より多くの人がテクノロジーに対する興味や関心を持ち、正しい理解を行うことが重要である。そのためには、かつて Apple 社が行ったような、計算機としてのコンピュータの機能を現実世界の物体や事象に置き換えることで理解を促進するというメタファによって隠蔽するのではなく、コンピュータそのものとして認識し、インタフェースの先の存在を意識できるようにすることが必要ではないだろうか。

## 2.3 本研究の目的

コンピュータをコンピュータそのものとして認識するためにはどうしたらいいのだろうか。コンピュータ上で扱われる情報はすべて 0 と 1 のバイナリ、電気のオン/オフによって表される。人間はその電気信号を知覚することができないため、コンピュータ上で行われるさまざまな処理や情報の動きを身体的に感じ取ることができない。我々の目に見えるケーブルの中をどういった信号が流れているかはその知識がなければわからない。

しかし、我々の身の周りの環境に隠されたコンピュータは、そのような見えない信号によって別のコンピュータとの通信を絶えず行っている。コンピュータ同士の通信で用いられる信号は人間が知覚することのできない電気信号である。一方、人間が他者と直接的にコミュニケーションをとる際に用いる信号は、動きや音といったような、人間が知覚でき、人間の行為によって発生させたり、干渉したりすることのできる信号である。このような信号のことを本研究では「身体的な信号」と呼ぶこととする。コンピュータ間の通信に用いられる電気信号を、身体的な信号を用いて置き換え知覚可能にすることで、信号に直接的にアクセスすることができるようになる。これにより、コンピュータで扱われる情報の流れを身体的に感じ取ることができ、よりその存在を顕在化させることができるようになるのではないかと考える。

そこで本研究では、コンピュータの扱うデジタル情報を、身体的な信号を用いて伝達できるようにすることを目的とする。また、上記の目的を達成するため、本研究の目的達成要件を次のように定める。

### A 人間が知覚可能な信号の利用

B 身体的な動作によって発生させることのできる信号の利用

C コンピュータ同士のデジタル通信システムの開発

これらの要件を満たすために，次章ではシステム開発のための先行研究・事例の調査を行い，開発するシステムの機能や構成を定める．



### 3 先行研究

本章では、システム開発のため、本研究と関連性の高い先行研究・事例について取り上げ、開発するシステムの機能とその構成を定める。

#### 3.1 音を用いた通信

人間がコミュニケーションに用いてきた身体的な信号の一つに音がある。はじめに音を信号に用いた通信についての調査を行う。

トーキングドラムは西アフリカにおいて、太鼓の音を用いて遠距離通信を行うためのものである。太鼓の膜の張りの強さを変えることで音の高さを変え、アフリカの言語の声調を表現することで、喋るように言葉を伝達する [9]。

19 世紀中ごろに通信に電気を用いる電信が普及すると、サミュエル・モールスが発明した電信機によって電気をオン・オフすることで符号を送信するモールス符号が発案された。モールス符号は、短点、長点、符号間の空白、単語間の空白、文章間の空白という離散的な符号によってアルファベットや文章を表すものである。電信機によって送られた信号は音響式受信機によって音に変換され、それを聞き取ることで符号を文字に書き換えていた。[10, 11]。

また、コンピュータで扱われる 0 と 1 からなるバイナリ情報を音として送信するためには、主に変調という技術が用いられる [12]。変調は送信したい信号を利用する通信路に適合する形態へ変換するための手法であり、変調する信号のことを変調信号といい、それをのせるための波を搬送波という。

デジタル信号を音に変調する装置にアナログモデムがある。ADSL のような高速なネットワークが普及する以前はインターネットに接続する際、電話回線を用いたネットワークを利用していた。そのため、電話回線を用いてダイヤルアップ接続を行うためにアナログモデムを使用し、コンピュータ上のデジタル信号を音声信号に変換していた [11]。

また、HDD のような外部記憶装置が安価になり、一般に普及する以前は、その代用としてデータを変調した音をカセットテープに録音することで情報を記録していた。0 を 1200Hz、1 を 2400Hz の音によって表す KCS (Kansas City Standard) や、更に通信速度を早めた SCS (Sapporo City Standard) などの規格が存在した [13, 14]。

これらは人間の可聴域の音を使用した情報伝達の方式であり、その音は人間が聴くことが

できるものである。一方で、近年では可聴域外の音を変調し、電波通信のような形で無線通信へと利用する例が多く見られる。エヴィクサー社が開発する Another Track[15] は人間の可聴域外の音を通信に利用する音声透かし技術を用いて映像の音声に字幕などの文字情報を乗せ、スマートデバイス間で通信を行うものである。また、Google 社も超音波を使った通信による決済を行うアプリケーション Tez[16] をインド限定で発表している。

このように、人間同士のコミュニケーションのみならず、音を用いてコンピュータ間でのデジタル通信を行う事例は多く報告されている。このことから、本研究においても信号に音を用いることでデジタル情報の伝達を行うことができると考える。

### 3.2 身体的動作によるインタラクション

一方で、デジタル信号をアナログ信号へ変換する変調を行うためには、そのための電気回路や装置が必要となる。人間の身体的な動作だけでその信号を発生させることは困難である。そのため、ここでは電気信号を使う必要のない、物理的な発音を用いたコンピュータとのインタラクションについての調査を行う。

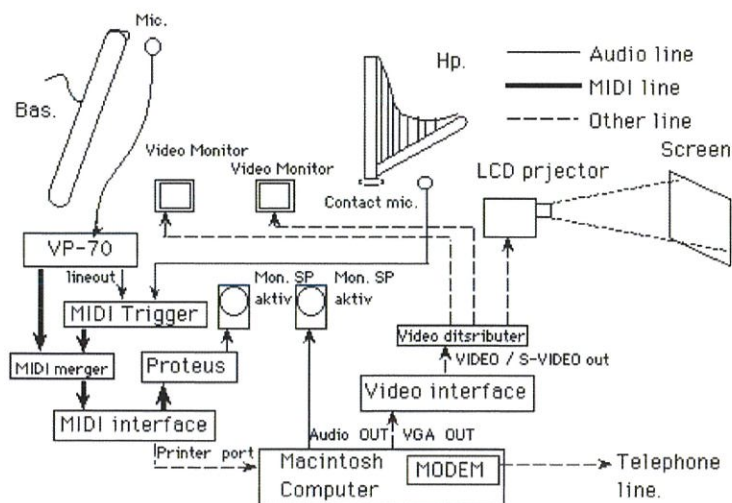
岡田美智男らによる Sociable Dining Table[17, 18] はダイニングテーブルの表面をコンコンとノックすることでアクチュエータやセンサを搭載したテーブル上のオブジェクトとのインタラクションを行う。また、金箱淳一による Vibration Cajon 3.0[19] は打楽器のカホンを叩くことで、その強さやリズムに応じて音や映像を出力するものである。平井らによる RapTapBath[20, 21] は浴槽の縁を「叩く」ことによる叩打音を利用するインタフェースであり、浴槽裏側に取り付けたピエゾセンサによって叩打位置の検出や叩打のリズムによるパターンの認識を行う。

また、Antti Jylhä らは拍手の音をコンピュータの入力として利用し、テンポの指定やゲーム操作などに利用することのできるインタフェースに関する研究を行っている [22]。

三輪眞弘の Send Mail[23] は、人間の演奏する楽器の音を文字入力インタフェースとしてコンピュータを操作し、メールを送信するというパフォーマンス作品である。演奏者のサクソフォンの音声を音高解析し、その結果を文字の入力へと変換する。その入力によってコンピュータをコマンド制御し、インターネットへの接続からメールの作成、送信を行う (図 4)。

このように、人間が出す音によってコンピュータとのインタラクションを行っている事例は多く見られることから、身体的な動作によって発音されるアナログな音でも、ある規則に従って音を入力することによってコンピュータに対し正確なデジタル情報を入力することが

また Sociable Dining Table や RapTapBath に用いられる、ものを「叩く」という動作は先のトーキングドラムにも見られるように、人間が音を用いてメッセージを伝えるときに用いる自然な動作であると考えられる。また、音を出すために特別な装置や道具を必要としない。これらのことから、本研究ではものを「叩く」ことによる叩打音に着目することとする。



また、通信システムにおいて情報を音として送信するためには、上記のモデムのようにデジタル信号を音声信号に変換する必要がある。電気信号のような、人間が本来知覚することのできない情報を、ビジュアルや音に変換することで知覚可能にする試みは盛んに行われている。その中でも音を用いて情報を提示することは「情報の可聴化」といい、非言語音を用いるものを特にソニフィケーションと呼ぶ [24]。可聴化は情報を提示するためのインタフェースや、メディアアート作品などで多く取り上げられる。

メディアアート作品などにもソニフィケーションの手法はよく用いられる。坂本龍一と真鍋大度によるセンシング・ストリームズ [26] は電磁波をセンシングし解析することにより、



可視化・可聴化を行う作品である。これにより、鑑賞者は時間と場所による電磁波の変化を感じ取ることができるものである。

これらの可聴化技術は主にコンピュータ上で音を合成したり、あらかじめ録音しておいた電気信号としての音をスピーカで空気の振動へ変換し音を鳴らすことによって情報を提示するものである。一方で、スピーカを用いず、物理的なものの振動によって音を鳴らす事例では、次のようなものがある。

三原聡一郎の作品「鈴」[27] (図5) はガラスドーム内のセンサが放射線を検知すると、ドーム内のガラスベルが音を立てるというもので、放射能という人間が知覚できない情報を電子を用い音として知覚可能にしている。

コンピュータによる楽器の演奏もデジタル情報を音で表現するという意味で一種の可聴化といえる。

明和電機のツクバシリーズ [28] は、100V 電流でモータや電磁石を動かすことで音を出す電動楽器のシリーズである。これはコンピュータから MIDI 信号を用いて楽器を制御して演奏をするものであり、MIDI 信号というデジタルデータをアクチュエータの制御情報へと変換し、音として表現している。また、ツクバシリーズの基本となるノッカー [29] は電磁石を用い、ものを叩くことで音を鳴らす装置である (図6)。

赤松音呂の Chijikinkutsu[30] は水、縫い針、ガラス、銅線によるサウンドインスタレーションである。磁化しておいた縫い針をガラスに入れた水に浮かべる。ガラスに取り付けられた銅線に電流を流すと、縫い針に力が働きガラスの表面にぶつかることで音を鳴らす。この作品も、MIDI によってコントロールを行うものである。

このように、情報をアクチュエータの動きに変換することで音として表現するものは多く見られる。中でも、ものを「叩く」という動作は人間にとっても機械にとっても、単純な動作によって音を出すことができるものである。そのため、本研究では、ものを叩くことによる打音を信号として用いることとする。



図5 「鈴」



図6 ツクバシリーズ「ノッカー」

### 3.4 本章のまとめ

#### 3.4.1 開発する機能の設定

以上を踏まえ，目的を達成するために必要なシステムの機能を次のように定める．

- 0 と 1 からなるデジタル情報をアクチュエータの制御情報へと変換する機能
- アクチュエータを制御しものを叩くことによって音を発生させる機能
- 打音による信号を受け取り，もとの情報へと復元する機能

#### 3.4.2 まとめ

本章では，システム開発のための先行研究・事例の調査を行い，「ものを叩く」という人間にも機械にも可能な動作によって生まれる音に着目し，システムに必要な機能を定めた．

次章では，ものの打音を信号として用いる場合の通信方法の設定と，情報の送受信を行うための通信端末装置の開発を行うこととする．



## 4 通信システムの開発

本章では，第3章で設定した機能を実現するため，ものを叩く音を用いた通信システムの開発を行う。

### 4.1 システムの概要

通信とは，情報を離れたところに伝達する情報交換の手段と定義することができる [12]。また，情報とは，コンピュータ上のファイルやデータだけではなく，音，映像，言葉，思考，感情といった伝えたいと思うあらゆることが含まれ，メッセージとも呼ばれる。通信はこのメッセージを伝達しやすい形に変換し，別の地点で復元するための手段である。情報理論を考案し，現在の情報社会に多大な影響をもたらしたクロード・シャノンは，通信における情報の伝達を「通信の数学的理論」の中で図7で表されるようにモデル化している [31]。

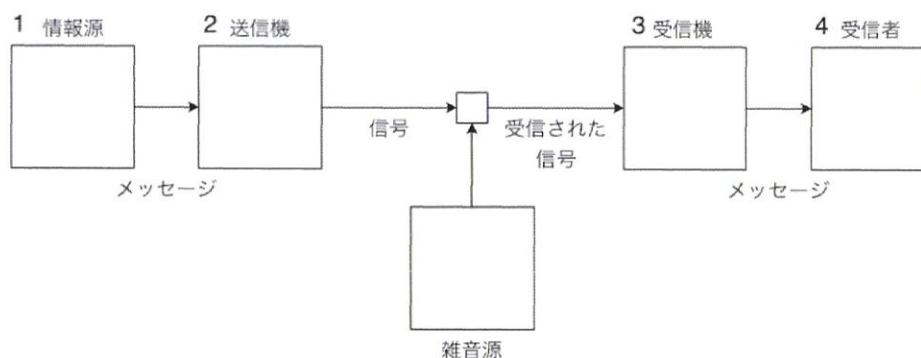


図7 一般的な通信システムのモデル

情報源とは，送信するメッセージの発生源である（図7-1）。送信機はそのメッセージを，利用する伝送路に適応した形態に変換するものである（図7-2）。例えば，電話機は声という情報を電話回線という伝送路に合わせ，電気信号という形態に変換する送信機である。受信機は受け取った信号をもとのメッセージに復元する機能を持つ（図7-3）。受信者はそのメッセージの対象となる人や物である（図7-4）。また，通信の際，実際に信号が通る道のことを伝送路や通信路と呼ぶ。通信を行う際には，情報源からのメッセージを送信機によって適切な信号へ変換し，伝送路を通して伝達される。その信号を受信機によって元の形へと復元し，受信者のもとへメッセージが伝えられる。

通信に用いられる信号にはこれまでさまざまな技術が用いられてきたが、現在では電気信号を用いる電気通信がその重要な位置を占めている。本システムでは、コンピュータ上で用いられる電気信号によるデジタル情報をものの打音という身体的な動作による音波信号によって伝送するために、打音を用いた通信方法について定める。その後、送信する情報を音に変換し伝送するための送信機と、受け取った信号を元の情報に戻す受信機を開発することとする。

## 4.2 ものの打音による通信方法

### 4.2.1 変調方式

はじめに、その通信方法について定める。情報の伝送に電気信号を用いる電気通信においては、伝送路は電気を通す物理的なケーブルである。音波信号を用いる場合、その伝送路は音が鳴る空間中の空気となる。空気を振動させることにより、信号は音として受信機に伝えられる。

0と1のバイナリからなるデジタル情報を音として伝送するためには、コンピュータで扱われる電気信号を音へ変換することが必要となる。このように信号を伝送路に適合する形態へと変換する操作を変調という。これは主に無線通信を行う際に電波に信号をのせるために使われることが多いが、音波への変換にも用いられる手法である。変調して送信する信号のことを変調信号といい、それをのせるための波を搬送波という [12]。

コンピュータで扱われるデジタル情報を送信するデジタル通信においては、デジタル信号によって搬送波を変調するデジタル変調方式が用いられる。デジタル変調方式には主なものとして、搬送波の振幅を変化させる ASK (Amplitude Shift Keying)、搬送波の周波数を変化させる FSK (Frequency Shift Keying)、搬送波の位相を変化させる PSK (Phase Shift Keying) の3つの方法がある [32] (図8)。

通常、搬送波には連続した正弦波が用いられることが多いが、ものの打音は、そのような人工的な連続波ではなく、時間経過と共にその振幅が減少していく減衰波である。そのため、従来の方式に改良を加え、減衰波によって0と1を表現する方法を考案する必要がある。

ものを叩くことで伝えられる情報は、次のようなものがある。

1. ものを叩いたかどうか
2. ものを叩く強さ
3. ものの打音の音高

#### 4. ものの打音の音色

このうち、1,2 は音波の振幅によって判断できる。3,4 は打音の周波数や音色についてのものである。また、音波の振幅は叩く「もの」ではなく、叩くという動作に着目したもので、「もの」の大きさや素材、形状に左右されずに伝達することができる。一方で、音の周波数や音色は叩く「もの」によって大きくその情報が左右される。そのため、本方式ではより単純に情報を伝達できる音の振幅によって情報伝達を行うこととする。

デジタル変調において、振幅の変化を用いる ASK はデジタル変調方式の中でも最も単純なもので、搬送波の ON/OFF で 0, 1 を表現するため、OOK (On-Off Keying) とも呼ばれる [32]。この OOK を応用し、搬送波の ON/OFF のかわりに、ものを叩く/叩かないということによって 0 と 1 を表現することとする。送信する信号の論理値が 0 の場合、従来の OOK と同じく、何も音を鳴らさないことでそれを表現する。信号の論理値の 1 を表現するために、信号が 1 へと変わったタイミングで打音を発生させることで信号を伝えることとする (図 9)。

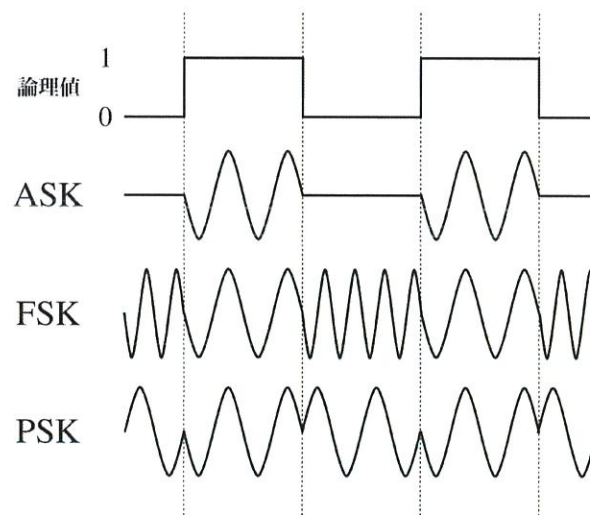


図 8 デジタル変調の例



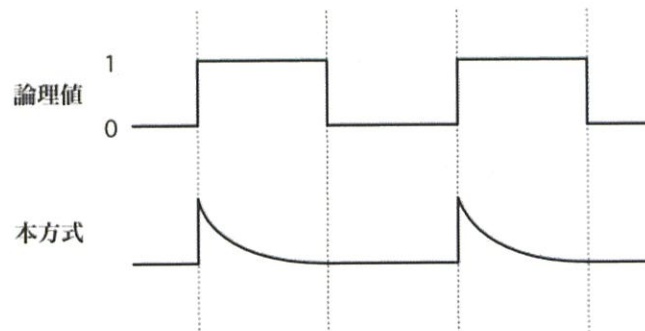


図9 打音によるデジタル信号の表現

#### 4.2.2 同期方式

信号を正確にもとの情報へ復元するためには、送信側で情報を送信するタイミングと、受信側がそれを読み取るタイミングを一致させる必要がある。送信側と受信側でそのタイミングを揃えるための技術を同期方式という。これには大きく分けて同期式と非同期式という2通りの方式がある[12]。

同期式の主なものとして、クロック同期がある。これはクロックと呼ばれる一定周期の信号をデータ信号とは別の伝送路を用いて受信側に送信することで、読み取りのタイミングを伝えるものである。クロック同期式は受信側で独立して時間を刻むためのクロックをもつ必要がないが、データの送信に伝送路を複数用意する必要がある。

非同期式は調歩同期式とも呼ばれる。これは同期にクロック信号を用いず、信号を読み取る周期をあらかじめ決めておき、スタートビットとストップビットと呼ばれる同期用のビットを情報に付加して送信することでタイミングの同期を行うものである(図10)。受信側でスタートビットを検知すると、そこを基準として決められた周期でデータを読み取り、情報を復元する。両者の間であらかじめ共有しておく通信速度の単位をbps (bit per second) と呼び、1秒間に何ビット送信するかを表す。非同期式の特徴として、複数の伝送路を必要としないが、受信側でも正確なクロックを搭載している必要がある。またスタートビットの受信にずれが生じると正しく受信ができないため、高速伝送には向かず、低速のデータ伝送に用いられることが多い。

ものの打音を用いて同期を行う場合の方式について検討を行う。クロック同期を行うためには複数の伝送路を用いて通信を行う必要がある。、送信側と受信側の同期には調歩同期式を用いることとする。

以上を踏まえ、以下のような手順で通信を行う。送信する情報を8ビット（1バイト）ごとのまとまりに分割し、その前後にスタートビットとして1、ストップビットとして0を付加する。定められた bps でものを叩く/叩かないことによって8ビットの情報を送信する。受信側でスタートビットを感知すると、そこを基準とし決められた周期の間に打音を検知したかどうかで0か1を判断する。これを8ビット分おこない、最後にストップビットを検出すると再度スタートビットを検知するまで待機状態に戻る（図 11, 12）。



図 10 調歩同期式

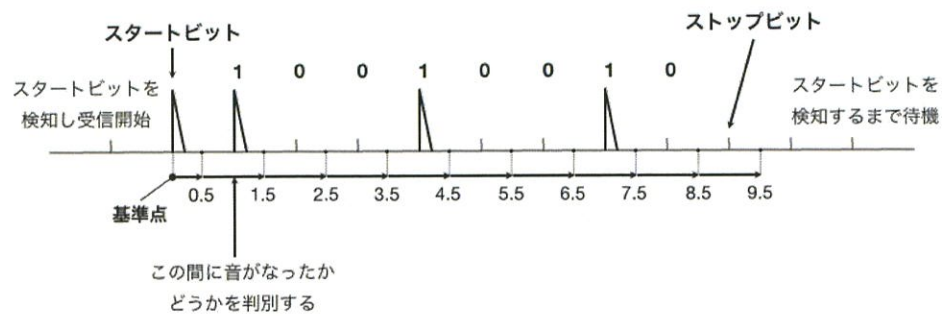


図 11 打音による調歩同期方式

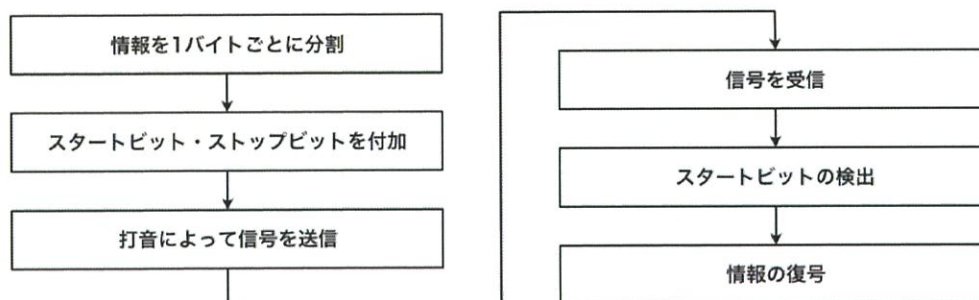


図 12 通信のフロー図



### 4.3 プロトタイプの制作

これらの通信方法を用い、実際にデータを送信することができるかどうかを検証するためのプロトタイプを制作する。

プロトタイプでは、送信機側で音を鳴らす音源として金属製の缶を、それを叩くためのアクチュエータにはソレノイドを用いる。受信機は、マイクを利用して音を電気信号へ変換し、それをコンピュータ上で処理することで信号の復号を行うものとする。送信機と受信機は1台のコンピュータによって制御され、データの送信と受信を行う。制御プログラム上で送信したい文字を入力すると、対応する文字コードの数値として送信機に送られ、通信方法に従いソレノイドを制御して音を鳴らす。その音を受信側のマイクで拾い、その波形から打音のアタックを検知することで0か1かを判断し、元の数値情報へと復号する。その数値を文字コードに従って再びアルファベットとして画面上に表示することで、正しく情報が伝達できたかを確認める。図13にそのシステム概要図を示す。

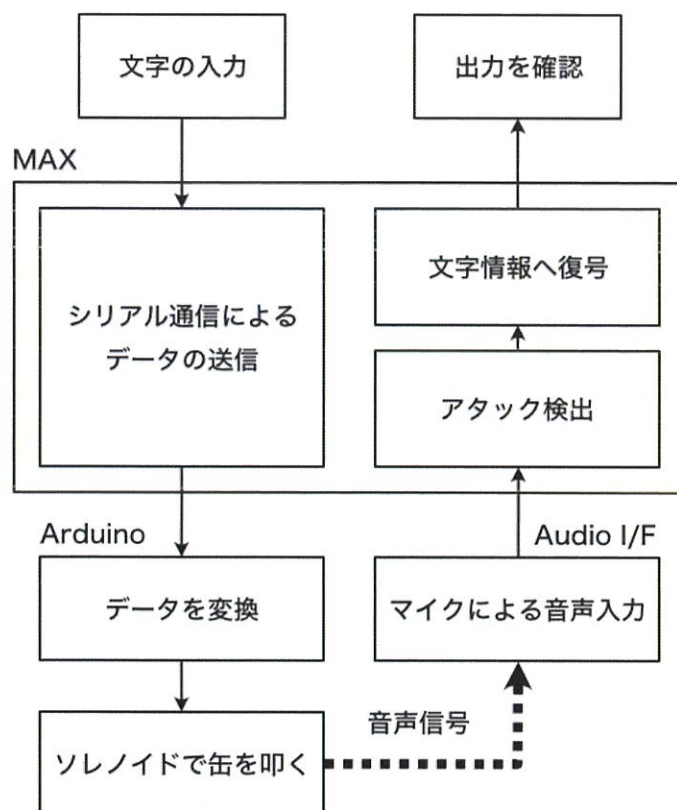


図13 プロトタイプのシステム概要図

#### 4.3.1 ハードウェア

音を出すためのソレノイドの制御には、フィジカルコンピューティングのためのプロトタイプングツールであるマイコンボード Arduino を使用する。Arduino Uno をコンピュータと接続し、シリアル通信によって文字コードの数値を 1 バイトずつ送信する。Arduino 上のマイコンでデータを受け取り、スタートビットとストップビットを付加した状態でソレノイドの制御情報へ変換する。

ソレノイドは、接続した MOS-FET を用いたスイッチング回路に 9V の電源電圧と制御信号を入力することで電気が流れ、動作する。ソレノイドによって音源である缶を叩くことで音を発生させる。

受信側では、マイクをオーディオインタフェースを経由してコンピュータへ接続し、音声信号の入力を行っている。

#### 4.3.2 制御用アプリケーション

送信するデータの入力と受け取ったデータの表示をするためのインタフェースと、マイクで入力した音声信号から打音のアタックを検知し、元の情報へと復号を行う制御用アプリケーションの実装を行う。実装にはマルチメディア向けグラフィカルプログラミング言語である、Cycling '74 社の MAX を用いる。

送信用のプログラムでは、テキスト入力用のボックスに送信したいメッセージを入力することで、そのメッセージをシリアル通信によって送信側の Arduino へと送ることができる。送信されたメッセージは Arduino によって処理され、ソレノイドの制御信号へ変換される。対応する文字は ASCII コードで表されるアルファベットと記号であり、文字情報から数値へと変換された状態で送信される（図 14）。

受信プログラムは、打音のアタック検出を行うアタック検出部とデータの復号を行う復号部からなる。マイクによって電気信号へと変換された音声信号ははじめにアタック検出部へ入力される。その信号をリアルタイム処理し、打音を検出したタイミングで信号を復号部へとへ入力する。復号部では、スタートビットを検出すると、一定間隔で打音を検出したか/していないかの判断を 8 ビット分行い、その結果を 2 進数の数値として出力する。出力した数値を ASCII コードに従い再度文字情報として復元し、受け取ったメッセージをテキストボックス上に表示する（図 15）。

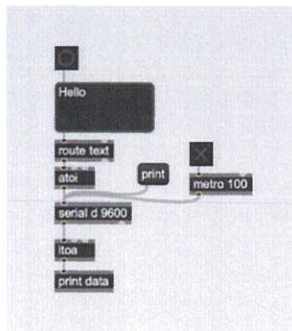


図 14 送信用プログラム

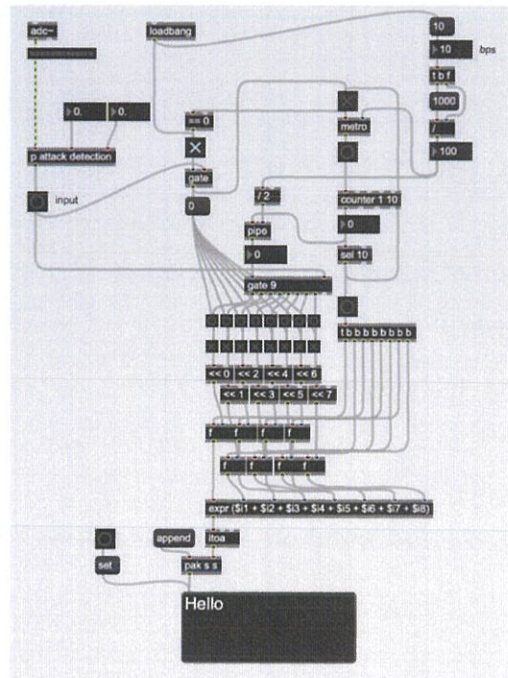


図 15 受信用プログラム

### 4.3.3 検証

制作したプロトタイプを使用し、簡単なメッセージを送る実験を行う。雑音の少ない環境で、ソレノイドを取り付けた缶を設置し、マイクを缶へ向け固定する。マイクの缶までの距離は 10cm 程度とする。通信速度は 1 秒間に 12 回缶を叩くことのできる 12bps とする。

送信要プログラムに簡単なメッセージを入力し、送信したところ、ソレノイドが動作し、缶を叩くことで音が発生した。それを受け取った受信側のプログラムでは、送信したメッセージが正しく送信されることが確認できた。このことから、設定した方法を用いることで、ものの叩音によって正しくデジタル情報を伝送できることがわかった。また、マイクの位置が離れ過ぎたり大きな雑音があると正しく情報を送信できず、誤ったメッセージを受信してしまうことがわかった。以上のことから、本研究ではここで定めた通信方法を用い、通信端末装置の実装を行っていく。



## 4.4 通信端末の実装

制作したプロトタイプを基に、通信に使用する通信端末装置として使用可能な送信機と受信機のハードウェアの実装を行う。

### 4.4.1 送信機

まず、送信機の実装を行う。送信機は送信したいメッセージをものの打音へと変換し音波として伝送するものであり、ソレノイドによって実際に音を鳴らす音源モジュールとそれを制御する制御用基板からなる。外部機器との接続はシリアル通信によって行う。送信機のシステム構成を図 16 に示す。

### 4.4.2 音源モジュール

音源モジュールは音源となる缶、音源を叩いて音を鳴らすためのソレノイド、ソレノイドを制御するためのスイッチング基板からなる。金属でできた缶の中に、ソレノイドとスイッチング基板が取り付けられている。スイッチング用の回路はプロトタイプで使ったものと同様である。回路に 9V の電源電圧と制御信号を入力することでソレノイドに電流が流れ、音源となる缶を叩くことで音を鳴らす。電源電圧と制御信号は基板に取り付けられた 3.5mm ステレオミニジャックから入力することができる。また、スイッチング回路についてはプリント基板を設計し、小型化を行っている。

### 4.4.3 制御用基板

情報源から受けとったバイナリ情報をソレノイドの制御情報へと変換し、それに基づいて音源モジュールへ信号を送るための制御用基板の実装を行う。デバイスの制御には、Arduino Nano を用いる。ボード上の USB レセプタクルあるいはシリアル通信用のピンを

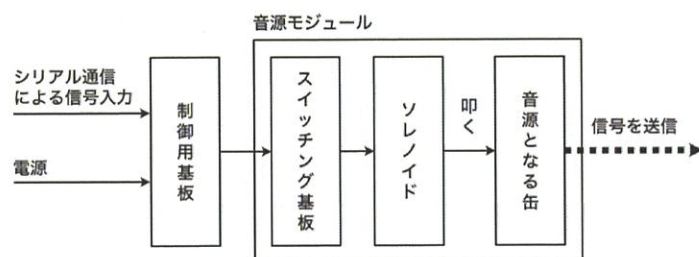


図 16 送信機のシステム構成図

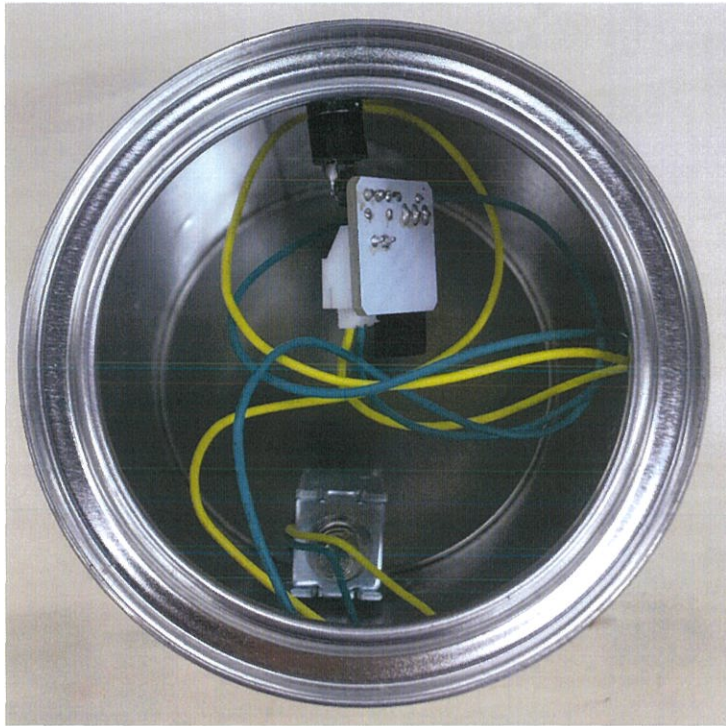


図 17 音源モジュールの内部

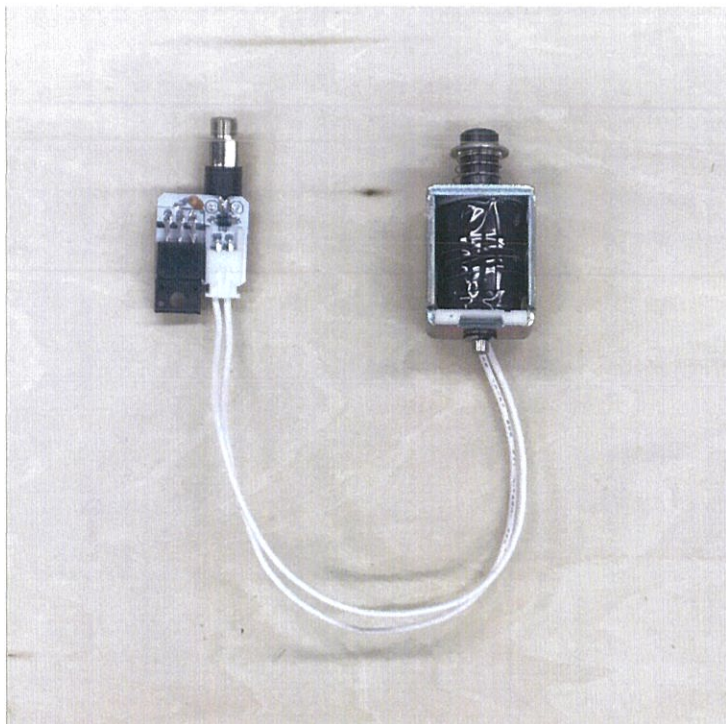


図 18 制作したスイッチング基板とソレノイド

用いて入力機器との接続を行う。接続した機器とは baud rate 9600 でシリアル通信を行い、バイナリデータを受け取る。それをプログラムによって処理し、ソレノイドの制御データへ変換する。AC アダプタによる 9V の電源電圧はソレノイドとマイコンボードの動作に利用する。マイコンボードは 5V で動作するため、レギュレータを用い 5V まで電圧を落としていく。音源モジュールとは 3.5mm ステレオミニプラグのケーブルによって接続され、電源電圧の供給と制御信号の送信を行う。送信機全体の回路図を図 20 に示す。

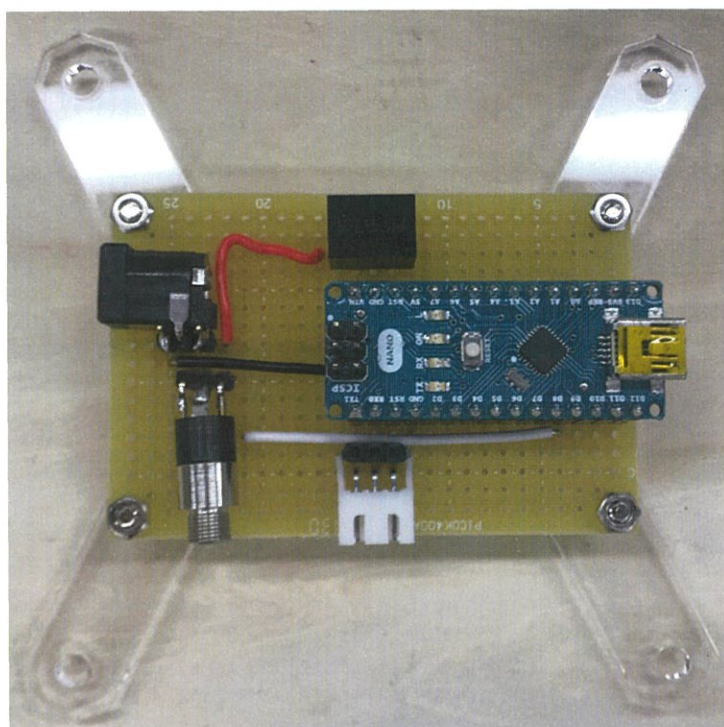


図 19 制御用基板

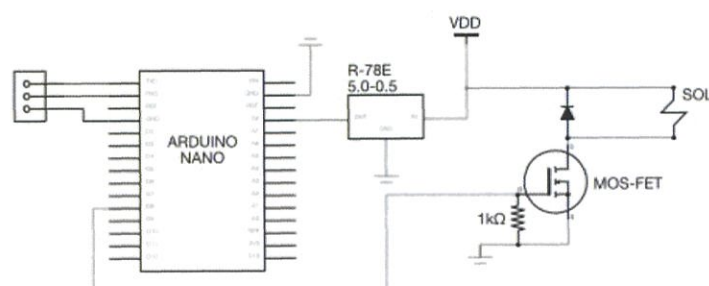


図 20 送信機全体の回路図



#### 4.4.4 受信機

次に、実装した受信機について述べる。受信機は送信機によって発生させられた音による信号を受け取り、元のメッセージへと復号する。まず、マイクによって受信した音を電気信号へ変換し、その信号を処理しすることで元の情報へ復号する。受信機のシステム構成を図 21 に示す。

音声信号の処理には、Raspberry Pi 3 Model B+ を用いる。Raspberry Pi は Raspberry Pi Foundation が製造する小型のシングルボードコンピュータであり、オープンソースの OS である Linux を動作させることが可能である。マイクの信号を、オーディオ・インタフェースを通して Raspberry Pi へ入力し、リアルタイム処理を行う。

マイクからの信号を処理し、元の情報へと復元する受信用のプログラムについては、基本的にプロトタイプと同様であるが、MAX で実装したプログラムは Linux 上では動作しないため、Linux で使用することのできるビジュアルプログラミング言語 PureData への機能の移植を行う。

#### 4.5 本章のまとめ

本章では第 3 章で設定した機能の実装のため、打音を用いた通信方法の設定と通信端末の実装を行った。

はじめに、ものの打音を用いた通信方法に関して検討を行い、デジタル変調方式の一つである ASK を応用し、ものを叩く/叩かないという二つの状態を用い 0 と 1 を表現する方法を考案した。

つぎに、定めた方式で通信を行うことのできるプロトタイプの制作を行った。制作したプ

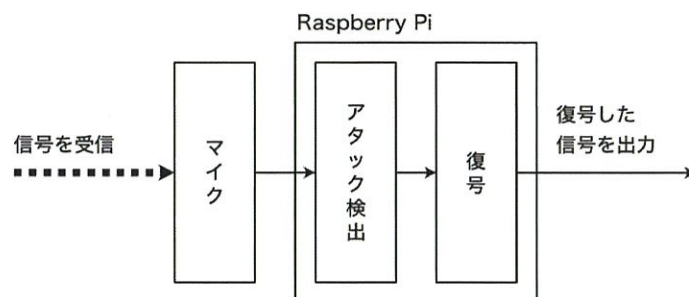


図 21 受信機のシステム構成図



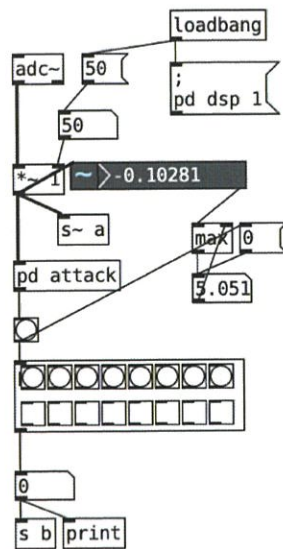


図 22 PureData で実装された復号用プログラム

ロトタイプを用い，データを送信する実験をおこなったところ，本方式でデジタル情報の送受信が可能であることがわかった。

その後，プロトタイプを基に，機器と接続し情報の送受信が可能な通信端末装置の開発を行った。次章では，これを人間が体験可能な形で提示するため，本章で開発したシステムを用いた作品の制作を行う。

## 5 作品の制作

本章では、通信システムとして、実際に情報の伝送を行うことができるかどうか確かめる。そのため、開発したシステムを用い人間が体験できるような形に落とし込んだ作品の制作を行う。

### 5.1 作品の構成

通信システムとして実際に使用するためには、送信するデータを生成する情報源と、その情報を届ける対象となる受信者が必要となる。作品を制作するにあたり、はじめに、送信するメッセージの種類と、それを発生させる情報源について検討する。

人間同士のコミュニケーションにおいて、声を用いた情報伝達は多くの人にとって自然なものである。これを通信システムに当てはめると、まず、人間の脳という情報源から発されたメッセージは、送信機である発声器官によって音声信号へ変換され、空間へと放たれる。その信号を受信機である耳と内耳器官が検知し、受信者である人間の脳へメッセージを伝達する。

さらにこれをコンピュータ同士の通信で置き換えてみるとどうなるだろうか。人間は頭で考えたことがらを他者に伝えるために言葉を話す。対して、コンピュータは人間と同じようにものごとを理解し、自ら考えることはなく、与えられた数列の演算による結果を出力するために通信を行う。

近年の AI 技術や深層学習の進歩によって、コンピュータもまるで人間であるかのように振る舞うことが可能になってきていると考える。しかし、一見文意を理解しているかのように見える深層学習による文章の自動生成も、学習データに基づいて、文字の並び順を確率的に計算したものに過ぎない。同じ「言葉を出力する」という行為でも、コンピュータと人間では全く行う処理が異なるということはコンピュータを理解する上で重要であると考ええる。

そのため、今回は深層学習による文章の自動生成を情報源とし、それによって出力される文字の配列という情報をメッセージとして扱うこととする。

次にメッセージの対象となる受信者についての検討を行う。ここで行われる通信はコンピュータ同士の言語を用いた会話とも言える。会話に用いられる言語を習得していなければ、その会話の意味を理解することはできない。そのため、通信が正しく行われているかを確認するためには、受信機が受信した情報を再び人間が理解できる形へと変換する必要がある。

る。また、その形態は通信に干渉しないように視覚情報であることが望ましい。

デジタル空間上の情報を視覚的な情報として提示する代表的なものとして液晶や LED 等によるディスプレイがあるが、今回はより物理的なものとしての出力を意識するため、表示そのものには電気をつかわず、受信した ASCII 文字を紙に印字して表示するプリンタを用いることとする。

プリンタを用い受信した信号を人間の認識できる文字という形に再度変換し提示する事によって、鑑賞者はコンピュータの用いる言語と人間の言語の対比を感じ取ることができるのではないかと考える。

以上を踏まえ、本作品では以下のような流れで情報伝達を行うものとする（図 23）。

1. 深層学習による文章の自動生成
2. 生成した文章の送信機への送信
3. 送信機による音声信号への変換
4. 受信機による信号の検出と復号
5. プリンタからの文字情報の出力

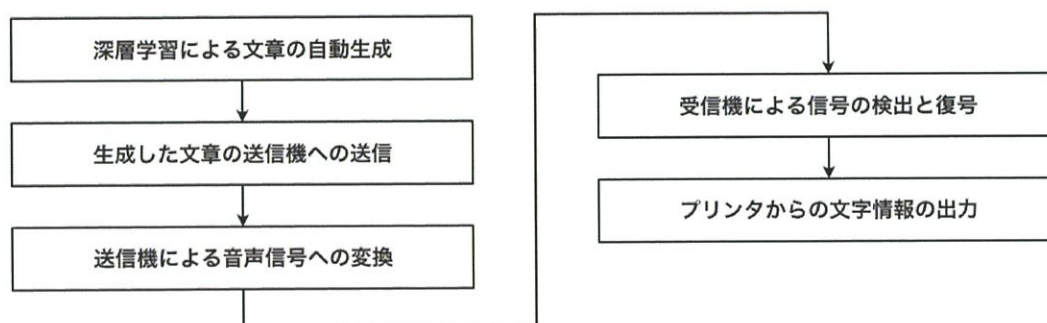


図 23 システム概要図

## 5.2 作品の実装

### 5.2.1 深層学習による文章の生成

上記の流れを実現するため、機能の実装を行う。はじめに、文章を学習させ、それに基づいて自動的に文章を生成して送信機へ送信するプログラムの実装を行う。Raspberry Pi 上でプログラムを動かすことを想定し、使用言語には Linux 上で動作させることのできる Python を用いた。深層学習のライブラリには Python で使用可能な TensorFlow と Keras を利用する。深層学習による文章の自動生成には、LSTM (Long-Short Term Memory) と呼ばれるニューラルネットワークアーキテクチャのモデルを用いる。

学習させる文章を用意する。このデータを学習させたモデルを用い、文章の自動生成を行う。はじめに文章を生成するもととなる文章から、200 文字分の文章を生成する。生成された文章はシリアル通信で送信機へと送られ、打音へと変換される。すべての文字が送信し終わると、生成した文章の終わり 40 文字をもとに、再度文章を生成する。これを繰り返すことでメッセージを送信し続ける。

### 5.2.2 サーマルプリンタによる文字の出力

文字を印字するプリンタには、レシートの印刷などによく用いられるサーマルプリンタ (感熱式プリンタ) を用いる (図 24)。サーマルプリンタは熱を加えることで色の変化する感熱紙を用いて印刷を行う。通常のプリンタに比べ印刷のクオリティは下がるが仕組みがシンプルであるため軽量小型であり、装置に組み込みやすい。またインクを使用しないため感熱紙のみで印刷が可能というメリットがある。

サーマルプリンタはシリアル通信によって文字コードやコマンドを入力することで制御することができるものを使用する。制御プログラムは受信機に使用する Raspberry Pi 上で動作させるため、実装には PureData を用いる。

受信機は 1 文字分のデータを受信すると、プリンタへその情報を転送する。プリンタはその情報を ASCII コード表に従い数値から文字へと変換し感熱紙にその文字を印字する。このようにデータを受信するごとに 1 文字ずつ文字を印字していき、それらが連なることで文章を表示する。

受け取った数値をプリンタへ送信し印刷を行うプログラムの実装を行う。まず受信機で複合した数値データを制御プログラムに入力する。ASCII コードには文字以外に、機器の制御に使われる制御文字も含まれる。プリンタでは図形文字のみを印字するため、アルファベッ



トと記号に相当する 32 126 (10 進) 以外の数値はプリンタに送信されないように場合分けする。

実際に印字するためには、複数の文字コードを送信したあとに改行記号を送信することで 1 行分の文字を印字する。1 文字ごとに印字を行うため 1 文字分の数値を送信するたびに改行コードである 10 (10 進) を送信する。また、コマンドを用いることで印字される文字の大きさや向きを変えることができるので、横向きに文章が流れていくように大きさと向きを設定する。送信機とプリンタは Raspberry Pi の GPIO を通して、baud rate 19200 でシリアル通信を行う。

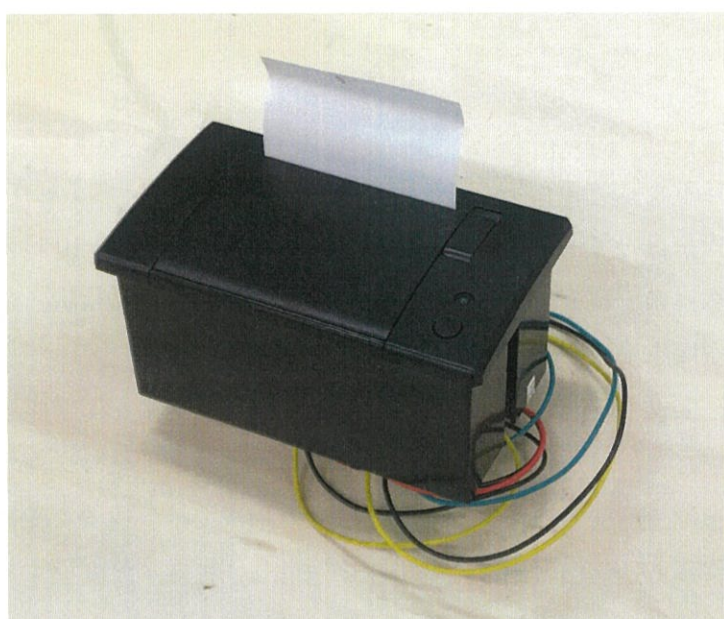


図 24 サーマルプリンタ

### 5.2.3 筐体の制作とシステムの統合

これらの実装したプログラムを前章で開発したシステムと組み合わせ、筐体の制作を行う。素材には主にレーザーカッターによってカットしたアクリル板と、全ねじ、ナットによって構成する。使用するパーツを図 25 に示す。送信側には情報源となるプログラムが動作する Raspberry Pi と、送信機の制御基板、音源モジュールを組み込み固定する。受信側の筐体には受信機となる Raspberry Pi とサーマルプリンタを固定し、マイクスタンドでにより固定されたマイクと接続する。完成した作品の外観を図 28, 29, 30 に示す。

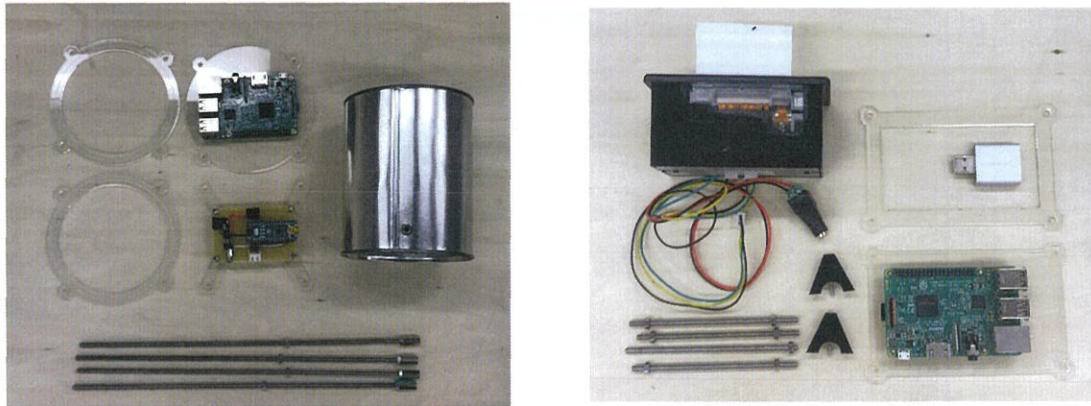


図 25 筐体を構成する部品

### 5.3 作品の展示

制作した作品を首都大学東京インダストリアルアート学科卒業・修了制作展にて展示した。展示は、首都大学東京日野キャンパスで2020年2月8日から2月10日の三日間開催された。展示空間には教室の一室を用いるため、部屋の広さに合わせ送信機・受信機を改変し複数設置することで空間を構成することとした。

展示では、文章を生成する情報源を含む送信機と受信した文字を印字する受信者を含む受信機に加えて、受信した信号を一度復号してから再度打音へと変換し送信する中継機を制作し配置した。中継機は受信機と送信機を組み合わせた構成で、受信機で受け取った情報を再びシリアル通信によって送信機の制御用基板へと送信し、打音へと変換するものである。

これにより、同一空間上で複数の送信機による通信が行われることとなる。また、情報源からの情報を送信する送信機と中継機に備わった送信機で通信のスピードを変えることで、二つの送信機が発生させる音にズレを生じさせた。

情報源を含む送信機（送信機1）と中継機の送信機（送信機2）、受信者（サーマルプリンタ）を含む受信機、中継機に接続されたマイク、受信機に接続されたマイクを、5本のマイクスタンドを使い自立させ、空間に配置した。また、送信機・受信機をマイクスタンドに取り付けるため、各筐体にスタンドに適合するねじが取り付けることのできるアクリルパーツを追加した。展示の様子とその構成図を図26、27に示す。



図 26 展示の様子

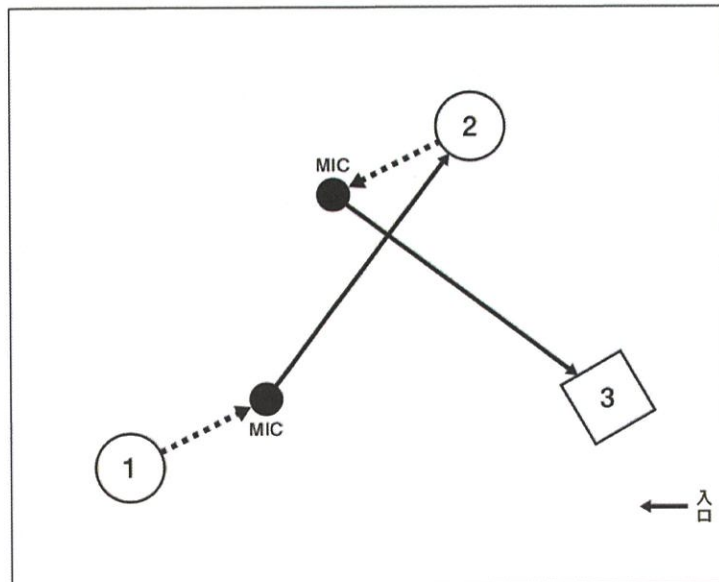


図 27 展示構成図



## 5.4 まとめ

本章では，開発したシステムを用い，生成した文章を打音によって送信する作品の制作を行った．送信するメッセージを深層学習による文章生成プログラムを用い文章の生成を行う．生成した文章を送信機に送ることで打音への変換を行う．受信機は信号を受信すると，もとの文字情報へと復号し，プリンタへ送ることでもとの文章が出力される．

次章では制作した作品の考察を行い，本研究の目的が達成できたかどうかを確かめる．

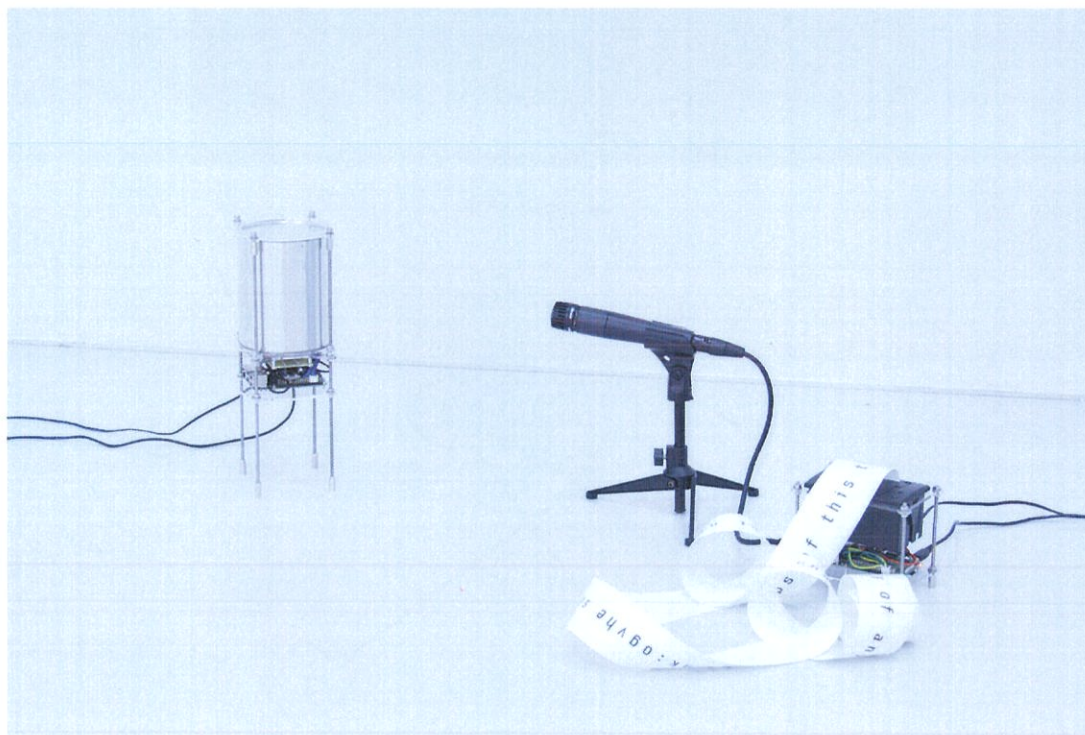


図 28 『BEAT/BIT』全体図





图 29 『BEAT/BIT』部分（送信側）

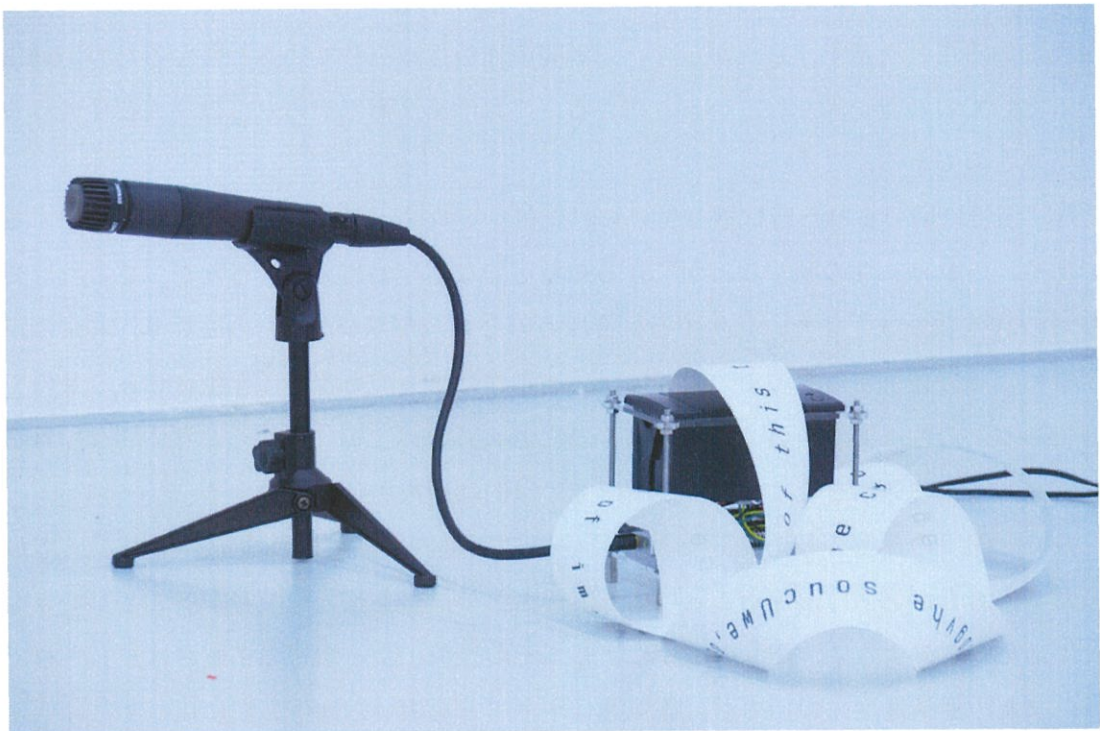


图 30 『BEAT/BIT』部分（受信側）

## 6 考察

本研究では、人間の知覚可能な身体的な信号を用いてデジタル情報を伝達することを目的とし、ものの打音を用いた通信システムの開発を行い、そのシステムを用いた作品を制作した。本章ではまず、制作した作品について通信システムという視点から考察し、目的が達成できているかを確認する。加えて、人とコンピュータをつなぐインタフェースの視点からも考察を行う。

### 6.1 通信システムの視点

第4章で実装した作品のシステムを実際に動作させたところ、生成した文章は人間の聴くことのできる、缶の打音として出力され、受信側のプリンタから文章が出力されることを確認することができた。筆者は、ここまでで制作した作品に「BEAT/BIT」と名付けることとする。

これにより、このシステムによってコンピュータ間で、何らかの情報が送信され、それを受信者が受け取り反応していることがわかった。これは送信機から送信された信号を受信機が受け取り、定められた通信方法にのっとり音声信号を元のデジタル情報へ復号し、受信者へ伝えていることを示す。したがって、二者間の通信は成立していると言えるため、通信システムとしての機能を満たしていると言える。これは第2章で定めた目標達成要件のうちCをみたすものである。

また、信号に用いられる音は取り付けられた缶をソレノイドが叩く事によって発生する打音である。これは人間の聴くことができる知覚可能な信号と言える。したがってこれは要件のうちのAを満たす。また、発生する打音はものどものがぶつかり合うという、非常に単純な現象によって発生するもので、人間の身体的動作によっても容易に発生させることのできる音である。これは要件のBをみたしていると言える。以上のことから、身体的な信号を用いデジタル情報の通信を行うという、本研究の目的は達成されたと考える。

一方で、部屋の反響の仕方や送信機と受信機の距離によってはうまく受信機が反応しなかったり、雑音が信号に混ざることによって、もとの信号を正しく復号することができないことがある。このように、周りの環境によってその通信による情報の正確さは左右されてしまう。また、通信速度についても、電気通信や他の音を用いた通信方法に比べ非常に低速である。そのため、高速かつ正確に情報を伝達するという本来のコンピュータ同士の通信シス



テムの目指す方向性においては改善が必要である。

## 6.2 インタフェース的視点

次に、人間とコンピュータの間で、情報のやりとりをするためのインタフェースとしての視点から考察を行う。情報源からの出力は缶を叩く音に変換され空間に放たれる。その音は人間が聴くことができるため、これは情報を可聴化したものと言える。しかしながら、その音はコンピュータの用いる0と1の電気信号をそのまま音として表現しているものであり、見たことのない文字でかかれた文章のように、発される音を聴くだけではもとのメッセージを理解することはできない。音によって情報を提示するという目的のためには、聴覚ディスプレイやソニフィケーションのような手法を用い、より直感的でわかりやすい音で情報を提示することが重要となる。

じまた、情報の入力に関しても、受信機はものの打音を検知するものであるため、人間がものや手を叩くことによって信号の入力をすることも可能である。意図した情報の入力を行うためには、まず入力したい情報を2進数で表し、それに従って正しいタイミングでものを叩き、受信機への信号入力を行う必要がある。これにより自由に文字入力ができるようになるためには、まず文字とそれを表現するバイナリ列の対応を覚え、それを正しく入力するために身体の動作を身につけることが必要となるが、学習には多くの時間と労力が必要となる。

本来、このような人間側に学習を必要とし、すぐに理解することのできない難解なインタフェースは恣意的なものであり、これまでヒューマン・コンピュータ・インタフェースが志向してきた「人間にとって使いやすいインタフェース」という考え方とは異なるものである。

しかし、本来多くの道具は学習や鍛錬を必要とするものであり、はじめから誰でも使うことのできる道具は存在しない。それらの道具は、使う人間が時間をかけてその使い方を習得していことではじめて透明なものとなり、身体の拡張として機能する。このように、道具としてコンピュータを用いるためには、ある程度の人間の身体の変化を前提としたインタフェース、つまり人間を変えるようなインタフェースが必要になってくるのではないだろうか。

モールス符号を通信に用いていた時代は、その符号を学習することによって、電気のオンオフによって発生する音を聞き取り、それを文字に直していた。はじめは符号の意味を理解することができなくても実際にその音を聞き続けることで次第に自由に信号を送ったり聞き

取ったりすることが可能になる。我々が用いる言葉や文字も、はじめは理解することができなくてもその意味と記号が結びつくことで段々と理解できるようになる。このように、人間はその記号によって自身の身体を変化させていくものである。

筆者は制作の過程で何度もこの信号に触れ、テストなどのため、実際に打音による入力することで、送信するバイトとバイトの区切りがわかる、単純なアルファベットであれば入力することができる、などの身体の変化を体験することができた。このように人間側の学習によってコンピュータの存在を意識し、対等な関係性を保ちながら道具的にコンピュータを利用していくことは可能なのではないか。本システムの開発によって、過度にコンピュータを人間に近づけていくのではなく、人間側もコンピュータによりそうことで、人間とコンピュータが互いに同一の言語で対話を行う可能性を提示する事ができたのではないかと考える。



## 7 結論

本研究の目的は、身体的な信号を用いデジタル通信を行うことであった。そのために、人間でも機械でも容易に行うことのできる「叩く」という動作に着目し、ものの打音を信号として用いた通信システムの開発を行った。

まず、通信にものの打音を用いるための通信方法を考案した。これは、デジタル変調における ASK のように 0 と 1 からなるデジタル信号を音を鳴らさない/鳴らすということで表現するものである。情報を 8 ビットづつに分け、それに読み取りのタイミングを同期するための情報を負荷し、ものの打音によって信号を送信する。受信側は信号を受信すると音が鳴ったか/鳴っていないかで 0, 1 を判断し、もとの情報へと復元する。

次に、この通信方法でデジタル通信が可能かを探るため、プロトタイプを制作した。プロトタイプでは、ソレノイドを制御し、金属製の缶を叩いて音を鳴らすことで情報を送信する。送信した信号をマイクで拾い、その信号を処理することで、もとの情報へと復号するものである。制作したプロトタイプを用い実験を行ったところ、この通信方法によってデジタル情報を送信できることが確認できた。

さらに、これを通信端末装置として使用するために、制作したプロトタイプを改良し、送信機と受信機の実装を行った。これは、通信端末として独立して動作させることができるようにした。また、外部機器との接続を行い、送信機への入力、受信機からの入力を可能にするものである。

そしてその後、通信システムとしての機能を実際に人間が体験できる形へと落とし込むため、開発したシステムを用いて通信を行う作品の制作を行った。作品を制作するため、以下の機能の実装を行った。まず、送信するメッセージを生成するために、深層学習を用いて文書言の生成を行う。その文章を一文字ずつ送信機へと送り、その信号を打音として送信する。受信側では、受信機によって復号されたメッセージを受け取り、サーマルプリンタを用いて一文字ずつ印字することで、文章の出力を行う。

制作した作品である通信装置を実際に動作させたところ、情報源で生成した文字情報にもとづき、送信機に取り付けられたソレノイドが缶を叩くことで、音が発生するのを確認することができた。また、その音を信号として受信した受信側のサーマルプリンタから文章が出力された。以上のことから、開発したシステムを用いて通信を行うことで、身体的な信号を用いたデジタル通信を行うことができたといえる。したがって本研究の目的は達成されたと

考える。

今後の展望としては、通信方式やアタック検出の改良などによる情報伝達の精度・速度の向上のような、通信システムとしての有用性を上げていくという方向性が考えられる。また、作品の制作に関して、送受信システムをより利用しやすくするためのパッケージ化・モジュール化を行い、様々な情報を用いて作品の制作を行うほか、複数の音源を用いた平行通信を行うなど、通信方法の拡張も行っていきたい。

## 謝辞

本研究の推進および論文の編集にあたって、ご協力いただいた皆様に厚く御礼を申し上げます。本研究を進めるにあたりご指導頂いた、指導教官である串山久美子先生に深く感謝いたします。並びに、副査としてご助言とご指導を頂きました、馬場哲晃先生、楠見清先生に深く感謝いたします。

また、研究や作品の制作に関してご助言を頂いた、日高良祐先生、安藤大地先生、須田拓也氏にも深く感謝いたします。並びに、執筆期間中研究に専念することを快諾してくださった島影圭佑氏に深く感謝いたします。

また、中原貴文氏には論文執筆にあたり友人として多くの助言と刺激をいただきました。ここに謝いたします。

最後に、研究室の皆様およびご協力いただいたすべての皆様に心から感謝申し上げます。本当にありがとうございました。



## 参考文献

- [1] J. C. R. Licklider. Man-Computer Symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, Vol. HFE-1, pp. 4–11, March 1960.
- [2] Ivan Edward Sutherland. Sketchpad: A man-machine graphical communication system.
- [3] Douglas C. Engelbart. Workstation history and the augmented knowledge workshop. *Proceedings of the ACM Conference on The history of personal workstations*.
- [4] Alan Kay. A personal computer for children of all ages. 1972.
- [5] 大谷和利. 「gui の起源と進化の概略」. 情報の科学と技術, Vol. 49, No. 12, 1999.
- [6] Mark Weiser. The computer for the 21st century. *Scientific American*, Vol. 265, No. 3, pp. 66–75, January 1991.
- [7] H. Ishii and B. Ullmer. Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proc. Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, pp. 234–241, Atlanta, GA, 1997. ACM Press.
- [8] 渡邊恵太. 「融けるデザインハード×ソフト×ネット時代の新たな設計論」. 株式会社ビー・エヌ・エヌ新社, 2015.
- [9] ジェイムズ・グリック. 「インフォメーション 情報技術の人類史」. 楡井浩一 訳. 新潮社, 2013.
- [10] チャールズ・ペゾルド. 「CODE コードから見たコンピュータのからくり」. 永山 操 訳. 日経 BP ソフトプレス, 2003.
- [11] 中野明. 「IT 全史 情報技術の 250 年を読む」. 祥伝社, 2017.
- [12] 遠藤靖典. 「改訂 情報通信ネットワーク」. コロナ社, 2010.
- [13] 千葉憲昭. 「カセット・テープにデータを保存していた時代の話」. [http://cbn.la.coocan.jp/petite\\_fleur/2017/09/post-4.html](http://cbn.la.coocan.jp/petite_fleur/2017/09/post-4.html). Petite Fleur 千葉憲昭のブログ (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [14] 大原雄介. 「pc 技術興亡史カセットテープからフロッピーディスク、そして hdd へ」. <https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/FEATURE/20150120/399780/>. 日経 xTECH (クロステック) (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [15] Evixar. 「another track」. <https://www.evixar.com/anothertrack>. (2020 年 1 月

17 日閲覧).

- [16] Google in Asia. 「introducing tez—a mobile payments and commerce app from google, made for india first」. <https://www.blog.google/topics/google-asia/introducing-tez/>. (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [17] 鴨田貴紀, 角裕輝, 竹井英行, 吉池佑太, 岡田美智男. Sociable dining table: 相互適応による「コンコン」インタフェースに向けて. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 12, No. 1, pp. 57–70, 2010.
- [18] ICD-LAB. 「sociable dinig table」. <https://www.icd.cs.tut.ac.jp/portfolio/sociable-dining-table-2006-2015/>. (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [19] 金箱淳一. 「vibration cajon 3.0」. [http://kanejun.com/works\\_vc3.html](http://kanejun.com/works_vc3.html). (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [20] 伊藤大毅, 平井重行. 叩打音を利用した操作インタフェースと浴槽への適用. WISS2013 論文誌, pp. 149–150, 2013.
- [21] 平井重行. 「raptapbath」. [http://ubiqmedia.cse.kyoto-su.ac.jp/?page\\_id=1247](http://ubiqmedia.cse.kyoto-su.ac.jp/?page_id=1247).
- [22] Antti Jylhä and Cumhur Erkut. A hand clap interface for sonic interaction with the computer. In *Proceedings of the 27th International Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI 2009*, pp. 3175–3180, 9 2009.
- [23] 三輪眞弘. 「サクソフォン, ピアノとコンピューターのための sendmail」. <http://www.iamas.ac.jp/~mmiwa/BoysLabelMM.html>. (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [24] Thomas Hermann, Andy Hunt, and John Neuhoff. *The Sonification Handbook*. 01 2011.
- [25] 丸井淳史. 音のためのインタフェース, 音によるインタフェース-楽器用エフェクターおよびソニフィケーション研究-. 精密工学会誌, Vol. 79, No. 6, pp. 503–505, 2013.
- [26] 坂本 龍一 + 真鍋大度. センシング・ストリームズ—不可視、不可聴」. [https://research.rhizomatiks.com/s/works/sensing\\_streams/](https://research.rhizomatiks.com/s/works/sensing_streams/).
- [27] 三原聡一郎. [空白] のプロジェクト「鈴」. <http://www.mhrs.jp/project/blank/>. (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [28] 明和電機. 「宇宙の力を 1 0 0 v に変えて動く電動楽器ツクバシリーズ」. <https://www.maywadenki.com/products/tsukuba/what-is-tsukuba/>. (2020 年 1 月 17 日閲覧).

- [29] 明和電機. 「ノッカー」. <https://www.maywadenki.com/products/tsukuba/ノッカー-knocker/>. (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [30] 赤松音呂. 「chijikinkutsu」. <http://www.neloakamatsu.jp/chijikinkutsu.html>. (2020 年 1 月 17 日閲覧).
- [31] Claude Elwood Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 379–423, 7 1948.
- [32] 下塩義文, 西山英治. 「実践的技術者のための電気電子系教科書シリーズ通信システム工学 アナログ・デジタル変復調技術」. 理工図書株式会社, 2018.